社交机器人在孤独症谱系障碍儿童中的应用

高丽梅[1] 汪凯[1] 李丹丹[1*]

[1]（安徽医科大学精神卫生与心理科学学院 安徽 230032）

摘要 孤独症谱系障碍(Autistic Spectrum Disorders, ASD)儿童的核心症状之一是社交互动障碍。早期干预对 ASD 儿童的社交能力发展至关重要，而传统心理干预方法存在耗时长、花费高昂、专业康复治疗师短缺等诸多局限性。随着人工智能技术的发展，社交机器人被广泛应用于 ASD 儿童社交能力的干预研究。社交机器人在 ASD 儿童干预中具有理论和实践层面的可行性，在分析了社交机器人干预 ASD 儿童社交互动现状的基础上，进一步探讨了社交机器人在 ASD 儿童干预中实验环境、方法等方面存在的优势与挑战。未来社交机器人在 ASD 儿童中的研究可考虑从探索人机双方特点开发新的社交场景，结合多模态和脑科学技术揭示人机互动的心理过程以及关注人工智能技术发展构建社交机器人闭环系统等方面展开。

关键词 社交机器人，孤独症谱系障碍，人机互动，社交技能

The application of social robots in intervention for children with

收稿时间：2023-01-10

* 国家自然科学青年基金：82301735、安徽医科大学基础与临床合作研究提升计划：2101054202

通讯作者：李丹丹，E-mail: lidandan050295@163.com

autism spectrum disorders

GAO Limei[1], WANG Kai[1], Li Dandan[1]

1 The School of Mental Health and Psychological Sciences, Anhui Medical University, Hefei, 230032, China

Abstract: Social interaction impairment is one of the core symptoms of children with Autistic Spectrum Disorders (ASD) which requires early intervention for successful social skills. The conventional approaches of psychological rehabilitation have many limitations such as time consuming, high cost, and shortage of professional rehabilitation therapists. With the development of artificial intelligence, social robots with their unique strengths are widely used in improving social interactions of children with ASD. This paper discusses the potential of social robots in the treatment of autism spectrum disorder and the current applications of social robots for the therapeutic treatment of joint attention, self-initiations, motor imitation, and other social function in ASD patients. It also analyzes the strengths and weaknesses of social robots during the intervention in terms of experimental environments and methods among other factors. It is proposed that future research can be conducted to develop new social scenarios based on the characteristics of human-robot interaction; combine multimodality and brain science and technology to reveal the psychological process of human-robot interaction; construct closed-loop systems for social robots by leveraging the advancing artificial intelligence technology.

Key words: social robots, autism spectrum disorder, human-robot interaction, social skills

1 引言

孤独症谱系障碍(Autistic Spectrum Disorders, ASD)是以社交互动障碍、重复受限的行为或兴趣为主要特点的广泛性神经发育障碍，其中，社交互动障碍是其核心症状(Genovese & Butler, 2023)。ASD 个体的发病与遗传和环境因素相关，暂时没有治愈的方法(Holeva et al., 2022)。传统的心理干预方法以行为治疗为主，但行为治疗方法需要耗费大量的时间、精力和金钱，给 ASD 儿童的家庭和社会带来沉重负担(Leaf et al., 2022)。近年来，随着人工智能的发展，社交机器人被广泛应用于 ASD 儿童的干预，并发现其能有效改善 ASD 儿童的社交互动障碍

(Chevalier et al., 2020)。本文基于社交机器人在 ASD 儿童干预中的可行性，梳理了社交机器人对 ASD 儿童社交能力干预的研究现状，进一步分析了社交机器人干预 ASD 儿童存在的优势与挑战，最后我们提出了未来研究的可能方向，希望为社交机器人对 ASD 儿童的干预提供新思路。

2 社交机器人在孤独症谱系障碍儿童干预中的可行性

社交机器人是机器人通过社交互动帮助人们提高社交能力的一种工具，其重点是实现机器人与用户的有效交互(Alabdulkareem et al., 2022)。基于当前社交机器人干预 ASD 儿童的研究发现，社交机器人普遍存在种类繁杂、使用标准不统一等问题，从而导致社交机器人对 ASD 儿童社交能力干预的可行性和效果难以评估。因此，本文从社交机器人的分类出发，在了解社交机器人类型和应用场景的基础上，进一步讨论了 ASD 儿童对社交机器人的偏好及其影响因素，从而为研究者设计和选择不同类型的社交机器人提供参考。

2.1 社交机器人在孤独症儿童干预中的分类

本研究将社交机器人从以下两个维度进行分类：灵活度和仿人程度(见图 1)。灵活度以机器人的自由度(Degree of freedom, Dof)为主要参考，机器人的可移动性为次要参考(Kumazaki et al., 2020)。其中，自由度是指机器人完成运动需要的最小坐标数。另外，仿人程度以肢体的完整度、面部的真实度为分类依据，根据仿人程度的高低可把机器人分为仿人机器人、非仿人机器人(见表 1)。在众多仿人机器人中，Nao 机器人由于灵活度和仿人程度均较高，在多种社交技能干预中

具有独特优势，因此其在 ASD 儿童干预中得以广泛应用(Alabdulkareem et al., 2022)。

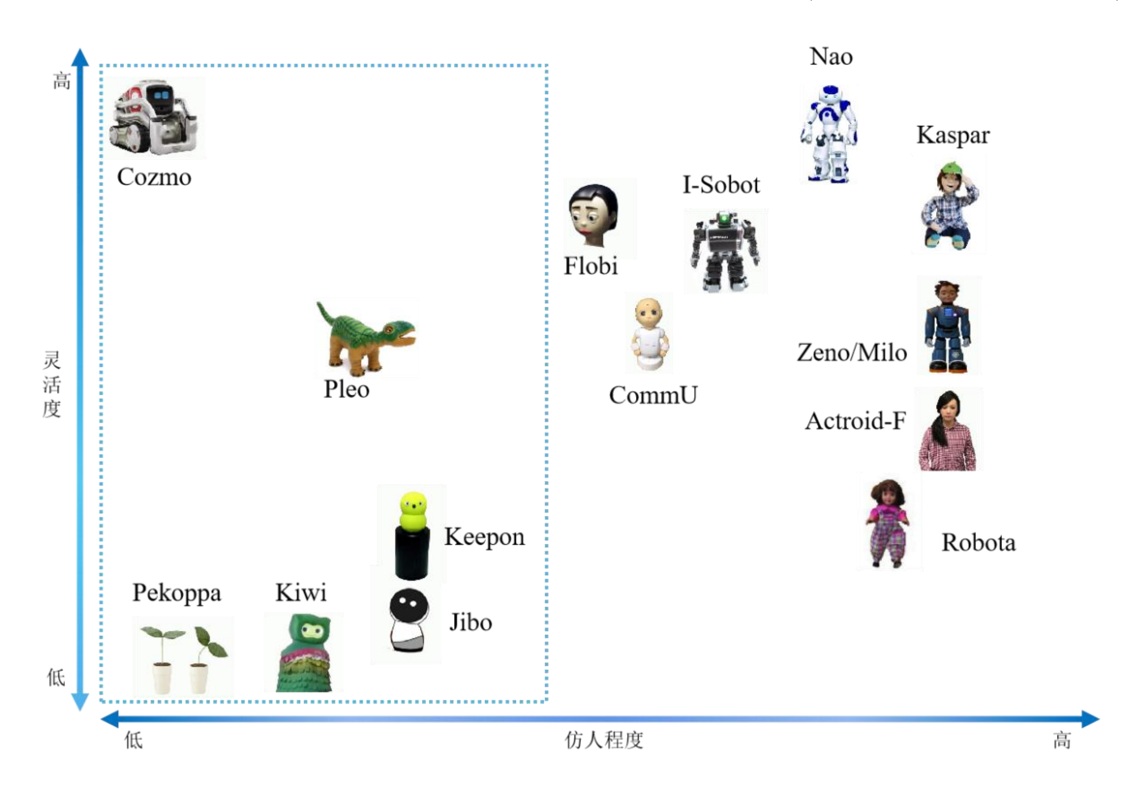


图 1 社交机器人分类

表 1 社交机器人分类介绍

类型	名称	干预方向	自由度/移动性 (单位：Dof)	肢体完整度	面部真实度	简单介绍
非仿人机器人	Cozmo	共情能力	可移动	无	无	通过轮子向各个方向移动，手部也可以进行简单互动(Ghiglino et al., 2021)。
	Pekoppa	社交沟通	无	无	无	通过点头对语音做出反应(Giannopulu et al., 2020)。
	Kiwi	社交沟通	无	无	基本面部特征	无法自主移动，多用于游戏提示(Jain et al., 2020)。
	Jibo	联合注意	3	无	基本面部特征	可将头部和身体旋转 360 度(Scassellati et al., 2018)。
	Keepon	社交沟通	4	无	基本面部特征	同步节奏跳舞，也可对人类触摸做出反应(Kozima et al., 2005)。
	Pleo	动作模仿	14	无	无	恐龙外形，可进行身体运动和发声(Peca et al., 2014)。
仿人机器人	Robota	共情能力	5	完整	具备面部特征	通过运动和声音表达情绪(Robins et al., 2006)。
	Actroid-F	社交沟通	12	完整	具备面部特征	女性，可完成眨眼、呼吸、凝视和头部移动等活动(Kumazaki, Warren, et al., 2018)。
	CommU	联合注意	14	不完整	具备面部特征	脸部可以显示简化的表情，噪音很小(Kumazaki, Yoshikawa, et al., 2018)。
	Zeno/Milo	共情能力 动作模仿	14	完整	具备面部特征	可表达情绪，做出多种肢体动作(Schadenberg et al., 2021)。
	I-Sobot	社交语言 动作模仿	17	完整	具备面部特征	完成多种动作、发音和声音指令，还可以演奏音乐等(Srinivasan et al., 2013)。
	Kaspar	社交语言 共情能力	17	完整	具备面部特征	腿部没有激活，有手势动作和有限表情，通过语音交互(Huijnen et al., 2019)。
	Flobi	联合注意	18	不完整	具备面部特征	机器人头，面部表情真实(Damm et al., 2013)。
	Nao	多种社交技能	25	完整	具备面部特征	具备语言能力，肢体灵活，可进行二次开发(Cao et al., 2019; David et al., 2018; Santos et al., 2021; Zheng et al., 2016, 2020)。

2.2 孤独症谱系障碍儿童对社交机器人的偏好

通过梳理 ASD 儿童对社交机器人偏好的研究发现，在非仿人机器人方面，ASD 儿童多对外观设计为卡通、动物等形象的机器人存在偏好。例如有研究让 ASD 儿童对 6 个社交机器人的喜爱程度进行排序，发现 ASD 儿童和正常发育(typically developing, TD)儿童最喜爱 Keepon 机器人，这提示了简单、夸张的卡通外表可以更好地吸引儿童的注意力。此外，ASD 儿童最不喜欢的是 Pleo 动物机器人，但却对 Probo 机器人有一定的偏好(腹部有屏幕的动物机器人)(Peca et al., 2014)，这可能是由于结合了机械元素的机器人对 ASD 儿童具有一定的视觉吸引力(Cabibihan et al., 2013)。在仿人机器人方面，ASD 儿童对机器人的外形和技术存在偏好。例如一项研究表明 4 名 ASD 儿童在与“机器人”（演员穿着普通机器人服装）互动时比与真人互动时的凝视、触摸、靠近等方面的得分显著提高(Robins et al., 2006)。另一项研究表明 8 名 ASD 儿童对于外观人性化的 Nao 仿人机器人（给 Nao 机器人穿上人类衣服，覆盖躯体和四肢）比对 Nao 仿人机器人在一般情绪和平均兴趣的得分更高(van Straten et al., 2018)。而且进一步研究也发现与正常同龄人相比，ASD 青少年与 CommU 仿人机器人互动时的自我表露程度更高(Kumazaki, Warren, et al., 2018)。同时，有研究发现孤独症谱系障碍商数量表得分较高的 ASD 个体(智商大于 100)更喜欢 Actroid-F 仿人机器人，而不是含有机械元素的仿人机器人和吉祥物机器人(Kumazaki et al., 2017)，并且 ASD 个体解释其偏好 Actroid-F 仿人机器人是由于该机器人技术先进。但由于目前研究存在样本小、机器人数量少、被试异质性较高等局限性，无法对机器人偏好得出一致性结论。

此外，社交机器人的外形越接近真人形象可能会引起正常人的“恐怖谷”效应。在 1970 年，日本机器人专家 Mori 提出“恐怖谷”效应，即当机器人看起来与人类相似但不完全相同时，可能会引发人类的不安全感，情绪反应会急剧下降, 但随着机器人外观变得与人类高度相似，情绪反应会回升。这一效应在猴子(Steckenfinger & Ghazanfar, 2009)、人类婴儿(Lewkowicz & Ghazanfar, 2012; Matsuda et al., 2012)和健康成人上得到验证(Saygin et al., 2012)。所以，为了避免“恐怖谷”效应，设计师常创造出看起来不像真人的机器人。

然而，ASD 个体对于仿人机器人的情绪反应与“恐怖谷”效应并不完全相同。基于“恐怖谷”效应，研究者提出了 ASD 个体的情感曲线模型(见图 2)，并对机器人辅助干预效果进行数值模拟，该模型以机器人外形的机械程度和仿人程度为横坐标，以正、负情绪反应(由公式计算出的情绪反应值)为纵坐标(Ueyama, 2015)。当情绪反应为正时，可以促进学习；当情绪反应为负时，会阻碍学习。从图 2 中可以看出 ASD 个体对仿人机器人可能并不存在“恐怖谷”效应而是具有“恐怖悬崖”(uncanny cliff)：当机器人在一定程度上变得更加仿人时，

并不会引起 ASD 个体的负性情绪；而当仿人机器人与真人难以区分时，仿人机器人可能引发 ASD 个体的社交回避，进而产生负面情绪。实证研究也发现 Kasper 仿人机器人会引发正常人的“恐怖谷”效应，但是 ASD 儿童却对其表现出主动社交和频繁触摸等积极行为 (Dautenhahn et al., 2009)。此外，从正常人和 ASD 个体对社交机器人开始产生负性情绪节点的差异性（两条情感曲线与横坐标的不同交点，蓝色阴影部分）可以发现，ASD 个体对仿人机器人的敏感度感知可能低于正常同龄人，这种低敏感性可以从强烈世界理论进行解释。该理论认为社会信息会引发 ASD 个体杏仁核的过度反应，当面对大量的社会信息(如多种面部表情、肢体动作等)时，ASD 个体容易产生情感压力和焦虑情绪，为了缓解这种负性情绪，他们表现出社交回避行为(范晓壮 等, 2020; Markram & Markram, 2010)。而仿人机器人在保留一定仿人元素的基础上，简化了其面部表情和肢体运动的复杂性，与真人相比，仿人机器人减少了大量社会信息的涌入，所以在一定程度上缓解了 ASD 个体的负面情绪。因此，ASD 个体对仿人机器人的低敏感度性可能是由于机器人的外观和技术等原因。

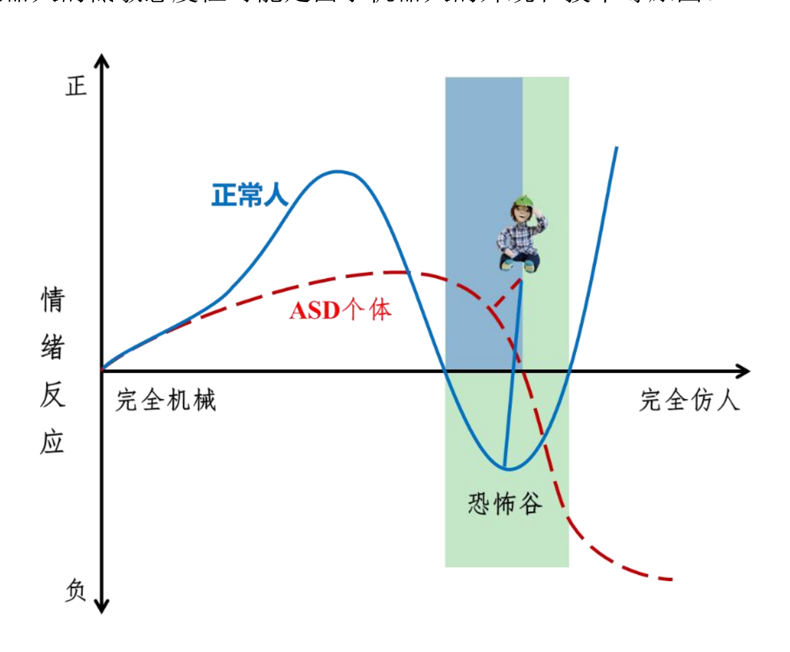


图 2 恐怖谷效应与恐怖悬崖，改编自 Ueyama 等人(2015)

2.3 孤独症谱系障碍儿童对社交机器人偏好的影响因素

ASD 儿童的性别、智力和症状表现等因素可能会影响其对社交机器人的偏好。例如一项研究认为男孩与女孩在对机器人的分类上存在差异，即男孩将 Kaspar 仿人机器人划分为人类，女孩则将其视为玩具(Coeckelbergh et al., 2016)。同时，ASD 个体的智商对机器人干预效果也会产生影响，有研究认为智商较低的 ASD 个体与 keepon 机器人互动较多，但智商较低的 ASD 个体较难从机器人干预中受益(Kozima et al., 2009)。此外，视觉敏感度较低的 ASD 儿童更容易处理来自机器人的社交线索，而听觉敏感性较高的 ASD 儿童则需要更加安

静的机器人(Chevalier et al., 2021)。除了上述因素可能会影响 ASD 儿童对社交机器人的偏好外，ASD 儿童的年龄阶段、个体经验、成长环境等内外因素都有可能对社交机器人的偏好产生影响，但目前研究者很少对这些因素进行探讨。因此，研究者在选用社交机器人干预时还需要对上述可能存在的影响因素进行进一步的实证研究探索。

2.4 社交机器人干预孤独症儿童可行性的理论假说

社交机器人作为干预 ASD 儿童社交障碍工具的可行性可以从心理学相关领域假说进行理解。基于“新本体”范畴假说(New ontological category, NOC)和社会动机理论，社交机器人对 ASD 儿童来说，其既是一种新的实体，也是一种社交奖励。因此，社交机器人在干预 ASD 儿童的社交障碍中可能具有一定的过渡性作用。

“新本体”范畴假说认为儿童会将社交机器人看作一种与人类不同的新实体(Kahn et al., 2013; Zhang et al., 2019)。例如一项研究表明学龄前儿童认为 Robovie 仿人机器人具有心理状态（有感情），是可成为朋友和被信任的社会存在，并且其在道德上应该被公平对待，不应该受到心理伤害(Kahn et al., 2012)。另一项研究发现 5 岁的儿童能够明确非仿人机器人 Dash 是无生命的，但 3 岁和 5 岁儿童认为 Nao 仿人机器人可能存在生命(Goldman et al., 2023)。这些研究提示了儿童可能将仿人机器人感知为一种新的本体。

此外，社交机器人不仅可作为干预工具使用，还可在干预中发挥社交奖励作用。社会动机理论认为 ASD 个体的社会动机存在缺陷，表现为社会定向受损、奖赏脑环路异常以及缺乏社交维持策略等方面(王磊 等, 2021)。在社会定向方面，研究发现 ASD 儿童看 Nao 机器人比看康复治疗师的时间更多(E. Bekele et al., 2014)；Damm 等人(2013)发现，ASD 个体对机器人脸也有更多的眼神注视。这些研究表明 ASD 个体对社交机器人可能存在一定的注视偏向。在社交奖赏方面，研究表明社交机器人会唤起儿童的好奇心，ASD 儿童可能会因为“新奇效应”积极参与实验(Croes & Antheunis, 2021)。在社交维持方面，Scassellati 等人(2018)发现，ASD 儿童在与社交机器人互动时的参与度更高，且在长达 40 天的干预中参与度保持一致。由此，社交机器人可作为一种社交奖励来激发 ASD 儿童的社交动机，在干预中发挥作用。

3 社交机器人在孤独症谱系障碍儿童社交互动中的研究现状

ASD 儿童在社交互动方面存在障碍，表现为联合注意损伤、难以主动发起社交、语言与非语言能力发育迟缓、共情缺陷以及动作模仿困难等方面。基于社交机器人干预 ASD 儿童的研究发现，社交机器人在 ASD 儿童的社交技能提升方面取得了一定的干预效果。接下来，本文从以下五个方面详细阐述社交机器人对 ASD 儿童的干预研究现状。

3.1 联合注意

联合注意（Joint attention, JA）是培养社交能力和早期认知能力的基础，在 ASD 儿童的发育中起着关键作用(Sano et al., 2021)。联合注意又被称为共同注意，是通过眼神注视、发声、手势等展示和协调物体与人之间的信息，并以此与他人分享注意力的能力(So et al., 2020)。ASD 儿童在社交机器人干预联合注意中表现出眼神注视增多、联合注意技能提升等方面的改善。研究发现与注视真人相比，ASD 儿童对 Nao 机器人的眼神注视增加，并且其对 Nao 机器人的注意不会随着时间推移减弱(E. T. Bekele et al., 2013)。同时，在使用 Jibo 机器人对 ASD 儿童进行干预后，ASD 儿童的 JA 技能得到改善(机器人提示减少)，社交沟通能力得以提升(Scassellati et al., 2018)。在 CommU 机器人干预后，ASD 儿童与人类互动的 JA 任务中也表现得更好(Kumazaki, Yoshikawa, et al., 2018)。并且，在 ASD 儿童掌握 JA 技能后，撤去 Nao 机器人，ASD 儿童的 JA 技能也有一定的维持效果(王蒙娜，2019)。此外，以往研究发现，Nao 机器人的高水平刺激(凝视、指向、发声)比低水平刺激(凝视、指向)诱发的 JA 得分更高(Warren et al., 2015)。

3.2 自我启动

自我启动(self-initiations)是一种主动发起社交互动的能力，而 ASD 儿童很少具有或不存在这种能力(Koegel et al., 2003)。自我启动可分为两种类型：一种是功能性自我启动，例如寻求帮助、物品或信息；另一种是社会性自我启动，例如寻求社会信息或评论(Verschuur et al., 2019)。研究发现，在机器人辅助干预后，ASD 儿童的自我启动能力(Huskens et al., 2013)和一般社交能力得以提高(Boccanfuso et al., 2017)。此外，机器人辅助关键反应训练组比单独使用关键反应训练组的功能性自我启动表现出更大地增长，但在社会性自我启动方面没有差异(De Korte et al., 2020)。

3.3 语言与非语言交流

ASD 儿童的语言与非语言交流障碍主要表现在两个方面：一方面，他们难以启动对话、参与对话以及无法响应他人的交流请求等；另一方面，他们在理解非语言行为(如肢体语言、手势和面部表情)并将其融入社交互动方面存在困难(Eigsti et al., 2011)。研究发现，与成人相比，ASD 儿童与机器人互动时产生的语言更多(Kim et al., 2013)，进一步研究也发现社交机器人的干预可以增加 ASD 儿童的口语时长(Srinivasan et al., 2016)。此外，当 ASD 儿童站在机器人视角，他们对非语言交流的理解程度提升，并且沟通表现力得以改善(Kumazaki et al., 2019)。

3.4 共情能力

共情可以分为认知共情和情绪共情，ASD 儿童在认知和情绪上都缺乏共情能力(Baron-Cohen, 2000)。在认知共情层面，他们难以认知到他人的情绪状态(即心理理论缺陷)；在情绪共情层面，他们难以与他人的情绪同步(Dziobek et al., 2008; Maliske et al., 2023)。有研究发现心理理论的干预训练可能会提高 ASD 儿童的共情能力(Holopainen et al., 2019)。同时，部分 ASD 儿童能够将错误信念归因于机器人，即他们可以推断出机器人的心理状态(Zhang et al., 2019)。这提示机器人对 ASD 儿童共情能力的干预可考虑从心理理论训练角度入手。此外，有研究发现人际同步可能会促进情绪共情，例如 ASD 儿童与真人互动时表现出人际不同步，但与机器人互动时表现出人际同步(心率显著增加)和情绪感受性提高，这说明机器人可能增强了 ASD 儿童的情感表现(Giannopulu et al., 2018; Giannopulu et al., 2020)。

3.5 动作模仿

模仿在 ASD 儿童的认知、语言和社交技能的发展中发挥着重要作用。手势是为了交流而自发产生的手部动作(Bono et al., 2004)，例如挥手告别、用手擦汗等。虽然 ASD 儿童手势功能发育迟缓的研究结果没有定论，但研究发现 ASD 个体可能选择性延迟了沟通手势(例如，挥手问好)的发展(Stieglitz Ham et al., 2010)。So 等人(2018)研究证明了 Nao 机器人可以改善 ASD 儿童早期手势发育迟缓现象，经过机器人干预后，ASD 儿童可以达到正常儿童的手势发展水平。同时，ASD 儿童在机器人干预下比真人干预下能产生更多的手势模仿行为，且 ASD 儿童的大动作模仿技能在机器人干预后得到提升，并在干预三个月后仍能保持模仿能力(Conti et al., 2021)。此外，手势模仿也会触发语言模仿行为，例如研究发现 ASD 儿童在机器人干预条件下的手势动作更有可能伴随语言模仿，比如在做出“过来”手势时会伴随语言“过来”(So et al., 2018)。

4 社交机器人对孤独谱系障碍儿童干预的优势与挑战

4.1 社交机器人优势

社交机器人的优势表现在两个方面：一方面是社交机器人在 ASD 儿童干预中的优势，具体表现 ASD 儿童在干预中的参与度提高、注意增多、积极情绪唤增强以及被试父母更容易理解和配合等方面。例如，社交机器人能够提高 ASD 儿童在实验中的参与度，ASD 儿童在机器人干预开始和结束时的参与度保持一致(Barnes et al., 2021)。同时，机器人吸引了 ASD 儿童更多的注意(Salimi et al., 2021)，ASD 儿童对机器人的脸更感兴趣，注视时间也更长(Damm et al., 2013)。社交机器人对 ASD 儿童的情绪也具有短期积极唤醒作用，可以缓解社交回避，诱导社会互动行为主动发生(黄碧玉，2018)。此外，有研究也发现父母对机器人干预的可接受性和依从性也很高。另一方面是社交机器人自身优势，例如，机器人的可预测性

和自我表露。机器人的可预测性是指机器人行为的可预测性，即一个人能够快速准确地学会预测机器人未来的行为，这是让儿童保持学习状态的重要因素。当机器人行为的可预测性较高时，ASD 儿童可能提高对机器人活动位置的视觉注意，从而逐渐加入与机器人的互动，这可能会对其学习产生积极影响，尤其是对视觉成分的学习任务(Schadenberg et al., 2021)。自我表露是指与自我有关信息的交流。机器人的自我表露会对儿童的情感产生影响，例如有研究表明社交机器人恰当的自我表露可提高儿童对机器人情感的评价，并且 ASD 儿童与 CommU 简单机器人互动比真人互动能够获得更大程度的自我表露(van Straten et al., 2022)。

4.2 干预方法的优势

相较于传统的干预方法，社交机器人可提供稳定的社交输出，行为的不确定性较少，并且能够持续性配合康复治疗师或家长完成 ASD 儿童目标行为的训练。一项研究表明，ASD 儿童(3~8 岁)能够坚持机器人辅助治疗方案(平均坚持治疗百分比 85.5%)，并在治疗后表现出积极的情感评级(86.6%的治疗为积极)，而且家长对机器人附加值的评分平均值高达 84. 8 分(0-100 评分)(van den Berk-Smeekens et al., 2020)。另一项研究表明在机器人干预后，ASD 儿童在向人类提出非言语请求的能力、对行为请求的理解及社交互动的倾向性比接受常规治疗的儿童有所提高(Ghiglino et al., 2021)。此外，父母是否在场对 ASD 儿童和社交机器人的互动没有显著影响(Amirova et al., 2022)。这些都表明社交机器人替代性或辅助性干预 ASD 儿童的潜力。

4.3 实验环境带来的挑战

机器人干预实验一般在家庭、康复机构、实验室等场所开展。但由于研究数据的收集主要依赖实验中采集的音频、视频以及活动表现，而实验中常常存在噪音(Kouroupa et al., 2022)，这可能影响干预的实施和效果评估。例如，当社交机器人用于家庭干预时，设备放置于参与者家中，参与者的兄弟姐妹、朋友以及邻居等人员有时会中断实验，从而影响参与者的表现。实验中设备位置发生变化也会给提取视觉特征增加干扰，影响干预效果评估。并且，由于机器人辅助干预系统并不是用于多元交互，可能无法捕捉到环境中的所有个体，从而降低了实验的内部效度。此外，由于康复机构的距离等因素，被试的流失率较高，导致被试量较少，从而影响到实验结果的可靠性和推广性。

4.4 实验方法的局限性

虽然社交机器人本身及干预方法存在优势，但是社交机器人在技术要求、成本投入以及技能泛化等方面存在一定的局限性。首先，在技术层面，社交机器人的影响无法进行单独测量，需要结合其他技术设备进行多模态的数据采集。但实验多采用音频、视频编码、活动表

现及皮肤电等技术，较少使用功能性磁共振成像、事件相关电位等脑科学设备，缺乏神经机制层面的探讨，没有揭示人机互动的心理过程。其次，考虑到成本、可维护性、适应性等问题，机器人干预仍不适合在临床环境中长期应用。尽管初始成本较高，但从长期来看，机器人技术提升和统一量产也会使得成本降低，企业盈亏在产业快速发展中很快会实现平衡。所以，社交机器人在 ASD 儿童社交能力的干预应用上仍有长期发展潜力。最后，在长期的社交机器人干预中，ASD 儿童是否会越来越喜欢和倾向于同机器交流从而减少与人的社交互动机会，并且 ASD 儿童在实验中学习到的社交技能是否能在真实环境中泛化，这些问题都需要进一步实证研究进行探索。

5 总结与展望

综上所述，社交机器人对 ASD 儿童社交能力的干预可能具有一定的可行性和有效性。首先，社交机器人可以考虑作为一种“过渡性客体”在干预中发挥作用，但其干预的可行性需充分考虑 ASD 儿童对社交机器人的偏好及其影响因素，并在进一步规范社交机器人的设计和选用标准的基础上开展干预研究。其次，已有研究的分析不仅丰富了我们对于社交机器人干预 ASD 儿童社交能力的理解与认知，也为后续研究提供了一定的发展方向。最后，在归纳和分析现有研究的基础上，未来可考虑从以下几个方面开展干预研究。

5.1 进一步探究人机双方特点，开发新的社交场景

尽管社交机器人对 ASD 儿童社交技能的干预取得了一定的成效，但是 ASD 儿童和社交机器人的互动特点和表现并没有得到充分探索。首先，社交机器人的外形、运动、自我表露以及干预时长等方面会对社交技能训练产生影响。研究表明，早期密集行为干预每周 25 小时较为有效(Mottron, 2017)，但很少有研究对社交机器人的干预时长进行探究。此外，目前的研究较少涉及 ASD 儿童的语言知识学习、生活技能等方面的训练，并且 ASD 儿童在年龄、性别、症状严重程度对社交机器人的干预效果是否产生影响，这些问题需要更多的实证性研究进行探讨。在未来研究中，可研发提供 ASD 儿童使用的仿人机器人，并融入多种互动表现方式。例如在机器人表现方面，仿人机器人可以通过舞蹈、音乐、瑜伽、游戏等形式调动 ASD 儿童参与的积极性和主动性；在机器人设计方面，社交机器人的仿人性需要得到充分考虑，研究者可开发普遍适用机器人和特殊定制机器人，并探究不同机器人的适用场景，从而达到社交机器人在不同场景下对 ASD 儿童学习技能的有效维持与泛化。

此外，除了社交能力，刻板行为也是需要进行干预的重要方向。基于以往研究，社交机器人对 ASD 儿童刻板行为的干预效果存在差异。例如有研究观察到在社交机器人干预 ASD 儿童后，ASD 儿童的刻板行为减少(Pennisi et al., 2016)，但也有研究发现在机器人干预中，

ASD 儿童的刻板行为和消极情绪可能会增加(Srinivasan et al., 2015)。因此，未来研究可考虑从采用社交机器人来干预 ASD 儿童的刻板行为等障碍，并探索开发新的社交场景。

5.2 结合多模态和脑科学技术，揭示人机互动的心理过程

虽然社交机器人干预 ASD 儿童社交技能的研究正在不断发展，但研究者很少关注 ASD 儿童在与社交机器人互动中的心理过程。未来研究可以结合多模态和脑科学等先进技术参与实验设计。首先，社交机器人可以结合多模态数据加强对行为学现象的分析。多模态数据识别包括视觉信息、听觉信息、语音、语义、语用、心率等多种数据，有助于反映人机互动行为背后的心理变化。其次，人机互动中还可采用功能性近红外光谱技术(Functional near-infrared spectroscopy, FNIRS)、事件相关电位(Event-related potential, ERP)、任务态功能磁共振成像(Task-based functional magnetic imaging, T-FMRI)等脑科学技术实时采集数据，从而进一步揭示 ASD 儿童与社交机器人互动过程中的神经机制。此外，为了避免 ASD 儿童与社交机器人交互中产生刻板行为，未来社交机器人可以增设预测并识别刻板行为功能，达到提醒治疗师对 ASD 儿童的刻板行为进行及时中断的目的。同时，可考虑在机器人干预 ASD 儿童社交技能前后采集静息态功能磁共振成像(Resting-state cerebral functional magnetic resonance imaging, rs-FMRI)，分析各个脑区在结构像和功能像的特征以及全脑功能连接的改善情况，从影像学角度揭示社交机器人干预效果的神经机制。综上，研究的开展依托于技术的支持，社交机器人的独立或辅助干预中更应该注重搭载人工智能和脑科学技术。

5.3 关注人工智能技术迭代，构建社交机器人闭环系统

虽然机器学习、监督学习等人工智能技术已被应用于自适应机器人系统，但社交机器人在主动学习方面仍存在不足，无法根据环境变化进行实时交互。有研究表明，虚拟现实(Virtual Reality, VR)、混合现实(Mixed Reality, XR)、扩展现实(Mixed Reality, MR)等人工智能技术可能会改善 ASD 儿童的认知能力，比如注意力、记忆、执行功能等，但由于 ASD 儿童对眼镜的不耐受性，实验往往只能选择高功能儿童，且被试量小，这些新技术具有应用场景有限、对被试要求较高、实验完成度较低等局限性(Chen et al., 2022; Shahmoradi & Rezayi, 2022)。而社交机器人可结合现代新型人工智能技术（例如计算机、电脑平板等）构建闭环人机交互系统，实现长期连贯的互动内容。闭环系统也称自适应机器人系统，指机器人不仅能够自主反应，而且能够根据行为反馈实时调整输出模式。此外，人工智能的算法革新也十分重要，社交机器人目前使用的个性化算法过于简单而且缺乏一种自适应模型，无法对需求和偏好进行优先排序和个性化，难以最大限度地发挥机器人辅助干预的潜力。因此，人工智能技术在测量和干预 ASD 儿童在机器人干预中的表现有很好的应用前景。

参考文献

[1] 黄碧玉．(2018). *社交机器人对孤独症儿童社交行为诱导效果研究*（硕士学位论文）．浙江工业大学.

[2] 范晓壮, 毕小彬, 谢宇, 贺荟中. (2020). 高功能自闭症个体对威胁性情绪面孔的注意偏向. *心理科学进展，28*(7)，1172-1186.

[3] 王磊, 贺荟中, 毕小彬, 周丽, 范晓壮. (2021). 社会动机理论视角下自闭症谱系障碍者的社交缺陷. *心理科学进展，29*(12)，2209-2223.

[4] 王蒙娜．*(2019)．基于社交机器人的孤独症儿童共同注意干预效果研究*（硕士学位论文）．浙江工业大学.

[5] Alabdulkareem, A., Alhakbani, N., & Al-Nafjan, A. (2022). A systematic review of research on robot-assisted therapy for children with autism. *Sensors, 22*(3), 944.

[6] Amirova, A., Rakhymbayeva, N., Zhanatkyzy, A., Telisheva, Z., & Sandygulova, A. (2022). Effects of parental involvement in robot-assisted autism therapy. *Journal of Autism and Developmental Disorders, 53*(1), 438-455.

[7] Barnes, J. A., Park, C. H., Howard, A., & Jeon, M. (2021). Child-robot interaction in a musical dance game: An exploratory comparison study between typically developing children and children with autism. *International Journal of Human-Computer Interaction*, *37*(3), 249–266.

[8] Baron-Cohen, S. (2000). Theory of mind and autism: A review. *International review of research in mental retardation*, *23*, 169-184.

[9] Bekele, E., Crittendon, J. A., Swanson, A., Sarkar, N., & Warren, Z. E. (2014). Pilot clinical application of an adaptive robotic system for young children with autism. *Autism: The International Journal of Research and Practice*, *18*(5), 598–608.

[10] Bekele, E. T., Lahiri, U., Swanson, A. R., Crittendon, J. A., Warren, Z. E., & Sarkar, N. (2013). A step towards developing adaptive robot-mediated intervention architecture (ARIA) for children with autism. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering: A Publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, *21*(2), 289–299.

[11] Boccanfuso, L., Scarborough, S., Abramson, R. K., Hall, A. V., Wright, H. H., & O'Kane, J. M. (2017). A low-cost socially assistive robot and robot-assisted intervention for children with autism spectrum disorder: Field trials and lessons learned. *Autonomous Robots*, *41*(3), 637–655.

[12] Bono, M. A., Daley, T., & Sigman, M. (2004). Relations among joint attention, amount of intervention and language gain in autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, *34*(5), 495–505.

[13] Cabibihan, J.-J., Javed, H., Ang, M., & Aljunied, S. M. (2013). Why robots? A survey on the roles and benefits of social robots in the therapy of children with autism. *International Journal of Social Robotics, 5*(4), 593–618.

[14] Cao, W., Song, W., Li, X., Zheng, S., Zhang, G., Wu, Y., He, S., Zhu, H., & Chen, J. (2019). Interaction with social robots: Improving gaze toward face but not necessarily joint attention in children with autism spectrum disorder. *Frontiers in Psychology, 10,* 1503.

[15] Chen, Y., Zhou, Z., Cao, M., Liu, M., Lin, Z., Yang, W., Yang, X., Dhaidhai, D., & Xiong, P. (2022). Extended Reality (XR) and telehealth interventions for children or adolescents with autism spectrum disorder: Systematic review of qualitative and quantitative studies. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *138*, 104683.

[16] Chevalier, P., Ghiglino, D., Floris, F., Priolo, T., & Wykowska, A. (2021). Visual and hearing sensitivity affect robot-based training for children diagnosed with autism spectrum disorder. *Frontiers in Robotics and AI*, *8*, 748853.

[17] Chevalier, P., Kompatsiari, K., Ciardo, F., & Wykowska, A. (2020). Examining joint attention with the use of humanoid robots-a new approach to study fundamental mechanisms of social cognition. *Psychonomic Bulletin & Review*, *27*(2), 217–236.

[18] Coeckelbergh, M., Pop, C., Simut, R., Peca, A., Pintea, S., David, D., & Vanderborght, B. (2016). A Survey of expectations about the role of robots in robot-assisted therapy for children with ASD: Ethical acceptability, trust, sociability, appearance, and attachment. *Science and Engineering Ethics*, *22*(1), 47–65.

[19] Conti, D., Trubia, G., Buono, S., Nuovo, S. D., & Nuovo, A. D. (2021). An empirical study on integrating a small humanoid robot to support the therapy of children with autism spectrum disorder and intellectual disability. *Interaction Studies*, *22*(2), 177–211.

[20] Croes, E. A. J., & Antheunis, M. L. (2021). Can we be friends with Mitsuku? A longitudinal study on the process of relationship formation between humans and a social chatbot. *Journal of Social and Personal Relationships*, *38*(1), 279–300.

[21] Damm, O., Malchus, K., Jaecks, P., Krach, S., Paulus, F., Naber, M., Jansen, A., Kamp-Becker, I., Einhaeuser-Treyer, W., Stenneken, P., & Wrede, B. (2013). Different gaze behavior in human-robot interaction in Asperger's syndrome: An eye-tracking study. *2013 IEEE RO-MAN*, 368–369.

[22] Dautenhahn, K., Nehaniv, C. L., Walters, M. L., Robins, B., Kose-Bagci, H., Mirza, N. A., & Blow, M. (2009). KASPAR – a minimally expressive humanoid robot for human–robot interaction research. *Applied*

Bionics and Biomechanics, *6*(3–4), 369–397.

[23] David, D. O., Costescu, C. A., Matu, S., Szentagotai, A., & Dobrean, A. (2018). Developing joint attention for children with autism in robot-enhanced therapy. *International Journal of Social Robotics*, *10*(5), 595–605.

[24] De Korte, M. W., van den Berk-Smeekens, I., van Dongen-Boomsma, M., Oosterling, I. J., Den Boer, J. C., Barakova, E. I., Lourens, T., Buitelaar, J. K., Glennon, J. C., & Staal, W. G. (2020). Self-initiations in young children with autism during pivotal response treatment with and without robot assistance. *Autism*, *24*(8), 2117–2128.

[25] Dziobek, I., Rogers, K., Fleck, S., Bahnemann, M., Heekeren, H. R., Wolf, O. T., & Convit, A. (2008). Dissociation of cognitive and emotional empathy in adults with Asperger syndrome using the Multifaceted Empathy Test (MET). *Journal of Autism and Developmental Disorders*, *38*(3), 464–473.

[26] Eigsti, I.-M., de Marchena, A. B., Schuh, J. M., & Kelley, E. (2011). Language acquisition in autism spectrum disorders: A developmental review. *Research in Autism Spectrum Disorders*, *5*(2), 681–691.

[27] Genovese, A., & Butler, M. G. (2023). The autism spectrum: Behavioral, psychiatric and genetic associations. *Genes*, *14*(3), 677.

[28] Ghiglino, D., Chevalier, P., Floris, F., Priolo, T., & Wykowska, A. (2021). Follow the white robot: Efficacy of robot-assistive training for children with autism spectrum disorder. *Research in Autism Spectrum Disorders*, *86*, 101822.

[29] Giannopulu, I., Etournaud, A., Terada, K., Velonaki, M., & Watanabe, T. (2020). Ordered interpersonal synchronisation in ASD children via robots. *Scientific Reports*, *10*(1), 17380.

[30] Giannopulu, I., Terada, K., & Watanabe, T. (2018). Communication using robots: A perception-action scenario in moderate ASD. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence, 30*(5), 603-613.

[31] Goldman, E. J., Baumann, A.-E., & Poulin-Dubois, D. (2023). Preschoolers' anthropomorphizing of robots: Do human-like properties matter? *Frontiers in Psychology*, *13*, 1102370.

[32] Holeva, V., Nikopoulou, V. A., Lytridis, C., Bazinas, C., Kechayas, P., Sidiropoulos, G., Papadopoulou, M., Kerasidou, M. D., Karatsioras, C., Geronikola, N., Papakostas, G. A., Kaburlasos, V. G., & Evangeliou, A. (2022). Effectiveness of a robot-assisted psychological intervention for children with autism spectrum disorder. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 1-17.

[33] Holopainen, A., de Veld, D. M. J., Hoddenbach, E., & Begeer, S. (2019). Does Theory of Mind Training Enhance Empathy in Autism? *Journal of Autism and Developmental Disorders*, *49(*10), 3965–3972.

[34] Huijnen, C. A. G. J., Lexis, M. A. S., Jansens, R., & de Witte, L. P. (2019). Roles, strengths and challenges of using robots in interventions for children with autism spectrum disorder (ASD). *Journal of Autism and Developmental Disorders*, *49*(1), 11–21.

[35] Huskens, B., Verschuur, R., Gillesen, J., Didden, R., & Barakova, E. (2013). Promoting question-asking in school-aged children with autism spectrum disorders: Effectiveness of a robot intervention compared to a human-trainer intervention. *Developmental Neurorehabilitation*, *16*(5), 345–356.

[36] Jain, S., Thiagarajan, B., Shi, Z., Clabaugh, C., & Matarić, M. J. (2020). Modeling engagement in long-term, in-home socially assistive robot interventions for children with autism spectrum disorders. *Science Robotics*, *5*(39), eaaz3791.

[37] Kahn, P. H., Gary, H. E., & Shen, S. (2013). Children's social relationships with current and near-future robots. *Child Development Perspectives*, *7*(1), 32–37.

[38] Kahn, P. H., Kanda, T., Ishiguro, H., Freier, N. G., Severson, R. L., Gill, B. T., Ruckert, J. H., & Shen, S. (2012). "Robovie, you'll have to go into the closet now": Children's social and moral relationships with a humanoid robot. *Developmental Psychology*, *48*(2), 303–314.

[39] Kim, E. S., Berkovits, L. D., Bernier, E. P., Leyzberg, D., Shic, F., Paul, R., & Scassellati, B. (2013). Social robots as embedded reinforcers of social behavior in children with autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, *43*(5), 1038–1049.

[40] Koegel, L. K., Carter, C. M., & Koegel, R. L. (2003). Teaching children with autism self-initiations as a pivotal response: *Topics in Language Disorders*, *23*(2), 134–145.

[41] Kouroupa, A., Laws, K. R., Irvine, K., Mengoni, S. E., Baird, A., & Sharma, S. (2022). The use of social robots with children and young people on the autism spectrum: A systematic review and meta-analysis. *PLOS ONE*, *17*(6), e0269800.

[42] Kozima, H., Michalowski, M. P., & Nakagawa, C. (2009). Keepon. *International Journal of Social Robotics*, *1*(1), 3–18.

[43] Kozima, H., Nakagawa, C., & Yasuda, Y. (2005). Interactive robots for communication-care: A case-study in autism therapy. *ROMAN 2005. IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, 2005*, 341–346.

[44] Kumazaki, H., Muramatsu, T., Yoshikawa, Y., Matsumoto, Y., Ishiguro, H., Kikuchi, M., Sumiyoshi, T., & Mimura, M. (2020). Optimal robot for intervention for individuals with autism spectrum disorders. *Psychiatry and Clinical Neurosciences*, *74*(11), 581–586.

[45] Kumazaki, H., Muramatsu, T., Yoshikawa, Y., Matsumoto, Y., Ishiguro, H., Sumiyoshi, T., Mimura, M., & Kikuchi, M. (2019). Comedic experience with two robots aided a child with autism spectrum disorder to realize the importance of nonverbal communication. *Psychiatry and Clinical Neurosciences*, *73*(7), 423.

[46] Kumazaki, H., Warren, Z., Muramatsu, T., Yoshikawa, Y., Matsumoto, Y., Miyao, M., Nakano, M., Mizushima, S., Wakita, Y., Ishiguro, H., Mimura, M., Minabe, Y., & Kikuchi, M. (2017). A pilot study for robot appearance preferences among high-functioning individuals with autism spectrum disorder: Implications for therapeutic use. *PloS One*, *12*(10), e0186581.

[47] Kumazaki, H., Warren, Z., Swanson, A., Yoshikawa, Y., Matsumoto, Y., Takahashi, H., Sarkar, N., Ishiguro, H., Mimura, M., Minabe, Y., & Kikuchi, M. (2018). Can robotic systems promote self-disclosure in adolescents with autism spectrum disorder? A Pilot Study. *Frontiers in Psychiatry*, *9*, 36.

[48] Kumazaki, H., Yoshikawa, Y., Yoshimura, Y., Ikeda, T., Hasegawa, C., Saito, D. N., Tomiyama, S., An, K.-M., Shimaya, J., Ishiguro, H., Matsumoto, Y., Minabe, Y., & Kikuchi, M. (2018). The impact of robotic intervention on joint attention in children with autism spectrum disorders. *Molecular Autism*, *9*, 46.

[49] Leaf, J. B., Cihon, J. H., Leaf, R., McEachin, J., Liu, N., Russell, N., Unumb, L., Shapiro, S., & Khosrowshahi, D. (2022). Concerns about ABA-based intervention: An evaluation and recommendations. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, *52*(6), 2838–2853.

[50] Lewkowicz, D. J., & Ghazanfar, A. A. (2012). The development of the uncanny valley in infants. *Developmental Psychobiology, 54*(2)*,* 124–132.

[51] Maliske, L. Z., Schurz, M., & Kanske, P. (2023). Interactions within the social brain: Co-activation and connectivity among networks enabling empathy and Theory of Mind. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 105080.*

[52] Markram, K., & Markram, H. (2010). The Intense World Theory – A Unifying Theory of the Neurobiology of Autism. *Frontiers in Human Neuroscience,* 224.

[53] Matsuda, Y.-T., Okamoto, Y., Ida, M., Okanoya, K., & Myowa-Yamakoshi, M. (2012). Infants prefer the faces of strangers or mothers to morphed faces: An uncanny valley between social novelty and familiarity. *Biology Letters*, *8*(5), 725–728.

[54] Mottron, L. (2017). Should we change targets and methods of early intervention in autism, in favor of a strengths-based education? *European Child & Adolescent Psychiatry*, *26*(7), 815–825.

[55] Peca, A., Simut, R., Pintea, S., Costescu, C., & Vanderborght, B. (2014). How do typically developing children and children with autism perceive different social robots? *Computers in Human Behavior*, *41*,

268–277.

[56] Pennisi, P., Tonacci, A., Tartarisco, G., Billeci, L., Ruta, L., Gangemi, S., & Pioggia, G. (2016). Autism and social robotics: A systematic review. *Autism Research*, *9*(2), 165–183.

[57] Robins, B., Dautenhahn, K., & Dubowski, J. (2006). Does appearance matter in the interaction of children with autism with a humanoid robot? *Interaction Studies. Social Behaviour and Communication in Biological and Artificial Systems*, *7*(3), 479–512.

[58] Salimi, Z., Jenabi, E., & Bashirian, S. (2021). Are social robots ready yet to be used in care and therapy of autism spectrum disorder: A systematic review of randomized controlled trials. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *129*, 1–16.

[59] Sano, M., Yoshimura, Y., Hirosawa, T., Hasegawa, C., An, K.-M., Tanaka, S., Naitou, N., & Kikuchi, M. (2021). Joint attention and intelligence in children with autism spectrum disorder without severe intellectual disability. *Autism Research: Official Journal of the International Society for Autism Research*, *14*(12), 2603–2612.

[60] Santos, L., Geminiani, A., Schydlo, P., Olivieri, I., Santos-Victor, J., & Pedrocchi, A. (2021). Design of a robotic coach for motor, social and cognitive skills training toward applications with ASD children. *Ieee Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, *29*, 1223–1232.

[61] Saygin, A. P., Chaminade, T., Ishiguro, H., Driver, J., & Frith, C. (2012). The thing that should not be: Predictive coding and the uncanny valley in perceiving human and humanoid robot actions. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *7*(4), 413–422.

[62] Scassellati, B., Boccanfuso, L., Huang, C.-M., Mademtzi, M., Qin, M., Salomons, N., Ventola, P., & Shic, F. (2018). Improving social skills in children with ASD using a long-term, in-home social robot. *Science Robotics*, *3*(21), eaat7544.

[63] Schadenberg, B. R., Reidsma, D., Evers, V., Davison, D. P., Li, J. J., Heylen, D. K. J., Neves, C., Alvito, P., Shen, J., Panti, M., Schuller, B. W., Cummins, N., Olaru, V., Sminchisescu, C., Dimitrijevic, S. B., Petrovic, S., Baranger, A., Williams, A., Alcorn, A. M., & Pellicano, E. (2021). Predictable robots for autistic children-variance in robot behaviour, idiosyncrasies in autistic children's characteristics, and child-robot engagement. *Acm Transactions on Computer-Human Interaction*, *28*(5), 36.

[64] Shahmoradi, L., & Rezayi, S. (2022). Cognitive rehabilitation in people with autism spectrum disorder: A systematic review of emerging virtual reality-based approaches. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, *19*(1), 91.

[65] So, W.-C., Cheng, C.-H., Lam, W.-Y., Huang, Y., Ng, K.-C., Tung, H.-C., & Wong, W. (2020). A robot-based play-drama intervention may improve the joint attention and functional play behaviors of Chinese-speaking preschoolers with autism spectrum disorder: A Pilot Study. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, *50*(2), 467–481.

[66] So, W.-C., Wong, M. K.-Y., Lam, W.-Y., Cheng, C.-H., Yang, J.-H., Huang, Y., Ng, P., Wong, W.-L., Ho, C.-L., Yeung, K.-L., & Lee, C.-C. (2018). Robot-based intervention may reduce delay in the production of intransitive gestures in Chinese-speaking preschoolers with autism spectrum disorder. *Molecular Autism*, *9*, 34.

[67] Srinivasan, S. M., Eigsti, I.-M., Gifford, T., & Bhat, A. N. (2016). The effects of embodied rhythm and robotic interventions on the spontaneous and responsive verbal communication skills of children with autism spectrum disorder (ASD): A further outcome of a pilot randomized controlled trial. *Research in Autism Spectrum Disorders*, *27*, 73–87.

[68] Srinivasan, S. M., Lynch, K. A., Bubela, D. J., Gifford, T. D., & Bhat, A. N. (2013). Effect of interactions between a child and a robot on imitation and praxis performance of typically developing children and a child with autism: A preliminary study and motor skills, *116*(3), 885–904.

[69] Srinivasan, S. M., Park, I. K., Neelly, L. B., & Bhat, A. N. (2015). A comparison of the effects of rhythm and robotic interventions on repetitive behaviors and affective states of children with autism spectrum disorder (ASD). *Research in Autism Spectrum Disorders*, *18*, 51–63.

[70] Steckenfinger, S. A., & Ghazanfar, A. A. (2009). Monkey visual behavior falls into the uncanny valley. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *106*(43), 18362–18366.

[71] Stieglitz Ham, H., Bartolo, A., Corley, M., Swanson, S., & Rajendran, G. (2010). Case report: Selective deficit in the production of intransitive gestures in an individual with autism. *Cortex*, *46*(3), 407–409.

[72] Ueyama, Y. (2015). A bayesian model of the uncanny valley effect for explaining the effects of therapeutic robots in autism spectrum disorder. *Plos One*, *10*(9), e0138642.

[73] van den Berk-Smeekens, I., van Dongen-Boomsma, M., De Korte, M. W. P., Den Boer, J. C., Oosterling, I. J., Peters-Scheffer, N. C., Buitelaar, J. K., Barakova, E., Lourens, T., Staal, W. G., & Glennon, J. C. (2020). Adherence and acceptability of a robot-assisted pivotal response treatment protocol for children with autism spectrum disorder. *Scientific Reports*, *10*(1), 8110.

[74] van Straten, C. L., Peter, J., Kühne, R., & Barco, A. (2022). On sharing and caring: Investigating the effects of a robot's self-disclosure and question- asking on children's robot perceptions and child-robot relationship

formation. *Computers in Human Behavior*, *129*, 107135.

[75] van Straten, C. L., Smeekens, I., Barakova, E., Glennon, J., Buitelaar, J., & Chen, A. (2018). Effects of robots' intonation and bodily appearance on robot-mediated communicative treatment outcomes for children with autism spectrum disorder. *Personal and Ubiquitous Computing*, *22*(2), 379–390.

[76] Verschuur, R., Huskens, B., & Didden, R. (2019). Effectiveness of parent education in pivotal response treatment on pivotal and collateral responses. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, *49*(9), 3477–3493.

[77] Warren, Z. E., Zheng, Z., Swanson, A. R., Bekele, E., Zhang, L., Crittendon, J. A., Weitlauf, A. F., & Sarkar, N. (2015). Can robotic interaction improve joint attention skills? *Journal of Autism and Developmental Disorders*, *45*(11), 3726–3734.

[78] Zhang, Y., Song, W., Tan, Z., Wang, Y., Lam, C. M., Hoi, S. P., Xiong, Q., Chen, J., & Yi, L. (2019). Theory of robot mind: False belief attribution to social robots in children with and without autism. *Frontiers in Psychology*, *10*, 1732.

[79] Zheng, Z., Nie, G., Swanson, A., Weitlauf, A., Warren, Z., & Sarkar, N. (2020). A randomized controlled trial of an intelligent robotic response to joint attention intervention system. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, *50*(8), 2819–2831.

[80] Zheng, Z., Young, E. M., Swanson, A. R., Weitlauf, A. S., Warren, Z. E., & Sarkar, N. (2016). Robot-mediated imitation skill training for children with autism. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering: A Publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, *24*(6), 682–691.